

双目视觉风洞测量系统实现的关键技术研究

曹文伦¹, 陈蓓^{2*}, 宋程³, 贺昱曜¹

- (1. 西北工业大学航海学院, 陕西 西安 710072;
2. 西北工业大学自动化学院, 陕西 西安 710072;
3. 合肥工业大学管理学院, 安徽 合肥 230009)

摘要:为了实现高温风洞内耐热材料动态烧蚀变形的高精度测量,设计了由主动投射线结构激光、移动高速相机平台和同步控制系统组成的双目同步采集测量软硬件系统。重点研究了对双目视觉测量系统精度和速度影响重大的相机标定、相机同步、图像纹理特征匹配等一系列关键问题。提出了工程上实用的标定方法和准则;基于线结构光主动投射和高速相机,将传统图像幅面特征匹配约束到特征线匹配上来,降低了匹配难度;使用局部搜索改进了传统灰度重心法,不仅加快了线结构光光条中心线的提取速度,同时过滤了部分杂光干扰,提升了图像质量。基于上述方法实现的高速同步触发的双目测量系统目前实现了对常温物体的精确测量,在工况为:待测物距为1 200 mm~1 500 mm,扫描幅面为200 mm × 200 mm,扫描间隔精度为1 mm时,完成一次扫描用时1 s,距离精度为±1 mm,且残差呈正态分布。

关键词:三维重建;双目视觉;风洞测量;非接触测量;立体视觉;线激光;无损检测

中图分类号: TP391.8; TM930.9 **文献标识码:** A **文章编号:** 1673-629X(2022)07-0128-05

doi: 10.3969/j.issn.1673-629X.2022.07.022

Key Issues Research in Realization of Binocular Vision Wind Tunnel Measurement System

CAO Wen-lun¹, CHEN Bei^{2*}, SONG Cheng³, HE Yu-yao¹

- (1. School of Marine Science and Technology, Northwestern Polytechnical University, Xi'an 710072, China
2. School of Automation, Northwestern Polytechnical University, Xi'an 710072, China;
3. School of Management, Hefei University of Technology, Hefei 230009, China)

Abstract: In order to achieve the high precision measurement of dynamic ablation deformation of heat-resistant materials in high-temperature wind tunnels, a binocular synchronous acquisition and measurement system is designed, which consists of a line structure laser projected actively, a mobile high-speed camera platform, and a synchronous control system. A series of key problems, such as camera calibration, camera synchronization and image texture feature matching, which have great influence on the accuracy and speed of binocular vision measurement system are studied. We propose the practical camera calibration methods and guidelines. Line structured light and ultra-high-speed camera are used to transform image surface feature matching into line matching, which reduces the difficulty of feature match. The use of local search improved the gray centroid method, which not only speeds up locating the center of the light bar, but also filters out the spot interference. The binocular measurement system has achieved accurate measurement of objects at room temperature with the area of 200 mm × 200 mm at the distance of 1 200 mm ~ 1 500 mm in 1 mm scan interval accuracy within 1 second, the distance accuracy is ±1 mm.

Key words: 3d reconstruction; binocular vision; wind tunnel test; non-contact measurement; stereo vision; line laser; nondestructive detection

0 引言

近年来,双目视觉测量作为一种非接触测量手段^[1-4]受到了学者的青睐,也取得了不错的应用效果。

本课题组也在这方面进行了一些研究^[5]。

视觉测量问题的关键在于提升图像特征匹配,计算精确视差:文献[6]采用算法来抑制待测物表面反

收稿日期:2021-07-15

修回日期:2021-11-17

基金项目:国家自然科学基金资助项目(51377134)

作者简介:曹文伦(1980-),男,博士,讲师,研究方向为工业信息和控制系统、测试系统;通信作者:陈蓓(1979-),女,博士,讲师,研究方向为控制理论与应用、导航与制导、测试、图像处理等。

光;文献[7]中的视差图是通过使用基于约束区域的立体匹配算法获得的;文献[8]采用环形激光作为辅助光源进行管道建模;文献[9]使用立体视觉区分静态/动态物体,用于在线自主车辆和移动机器人。

针对耐热材料烧蚀变形的高温风洞测量问题,因其具有相当的特殊性,其真实数据获取、数据分析及工程解决方案尚存在很多问题,比如高温、高焓、高压,待测物表面特征匹配难度大,隔着观察窗远距离测量和双目欠同步影响精度,以及传统双目测量不能实时反映测量的动态过程,数据采集、存储及后处理的难度大、自动化程度低等。因此,研究和开发新的耐热结构动态烧蚀外形测量方法与技术,有着重要的意义与应用前景。

1 系统设计

传统的双目视觉立体测量方法面临的主要问题是需要对左右相机拍摄得到的图像进行特征匹配。而对于该文涉及的纹理特征不显著的待测工件来说,进行特征匹配难度很大,导致最终精度也不理想。

该系统设计了主动投射的线结构激光,以增加对象纹理(见图1)。在1/200秒内利用线激光投射技术在待测物表面投射激光线;同样在1/200秒内采集左右两个相机图像(图1:Step1);在一秒内让激光线在待测物表面移动200个位置,且相机同步拍摄200对图像(图1:Step2);对上一步骤中的每一对图像逐一计算其视差,得到待测物体表面激光投射中心线所在位置的三维坐标(图1:Step3);最后组合200个不同位置的三维数据得到整个激光扫描面的三维数据(图1:Step4)。

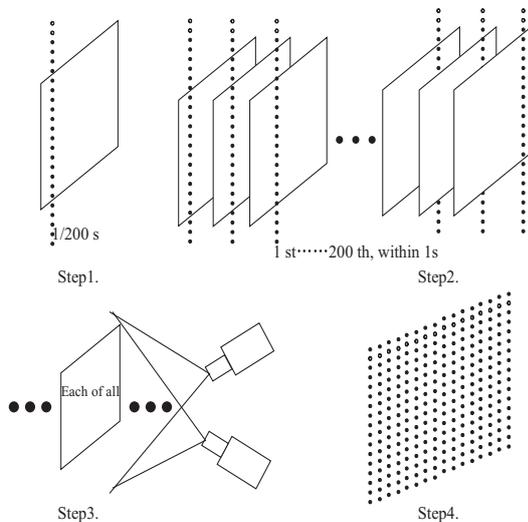


图 1 点云生成示意图

该方法的优点是简化了特征匹配的复杂度,但对硬件性能和控制系统的各项指标要求则较高,它们之间的关系如下:

设扫描精度(平均点距指标)为 d ,完成一次幅面扫描为 t ,扫描幅面的边长为 l 。

那么在 t 时间内,应该获取 $n = l/d$ 条检测线;

线激光的速度要求满足: $v = l/t$;

双目相机的帧率要求至少为: $v = l/t$ 。

双目视觉在风洞测量方面有其非接触、受风洞环境干扰小等独特的优势,文献[10-13]通过在待测工件表面提前标记特征点的方法实现了风洞内试验模型的形变和姿态测量;文献[14-15]改进了标记特征点的方法,使用了投射结构光结合双目视觉的方式实现了冰形和模型位姿的测量。但是文献[10-14]使用的测量设备均安装在风洞内部,文献[15]虽然将测量设备放在了观察窗外实现了待测件姿态测量,但其测量对象仍为常温。

根据上述关系,约束线激光在直线导轨上的精确位置或时刻,触发双目相机同时拍照,并设定曝光时间和增益以使采集的图像达到成像要求。

该系统为保证左右视图匹配良好需解决以下几个主要问题:(1)系统标定图像的同步采集;(2)左右图像采集的同步问题;(3)激光中心线的精确定位。另外,待测物的尺寸和动态测量要求的实时性对线激光扫描精度和速度、相机视野及拍摄帧率,以及实验数据采集、存储和后处理提出了不小的挑战。

2 系统组成

为了解决上节末提出的问题,设计了基于高速相机和线激光器的非接触测量同步采集和控制系统硬件,如图2所示。该测量系统由同步控制子系统、激光投射子系统和图像采集子系统三部分组成。

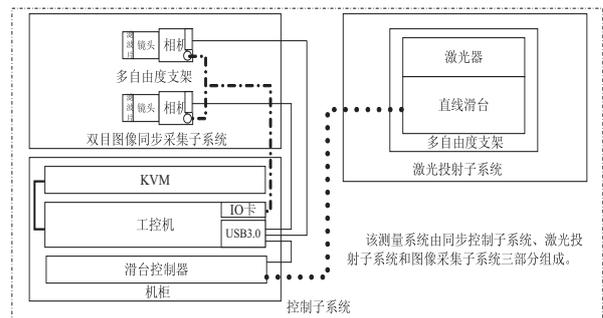


图 2 同步触发双目测量系统组成

测量系统主体设备包括:PCIE 高速 IO 卡及高性能上位机 1 台、激光器和高精度滑台各 1 个、相机支架 1 个、高速相机 2 个、定焦镜头和滤镜各 2 个。滑台上的线激光器在伺服电机控制下对待测工件幅面进行周期扫描;工控机协调同步控制 IO 卡向高速相机发送同步触发信号,控制左右相机对工件图像进行同步采集;随后在工控机内完成图像命名、存储;事后对扫描幅面图像组进行光条中心线提取、特征匹配、三维点云计算

及整体三维点云合成等后处理。

3 系统实现

为了使系统在高速度下实现高精度的要求,除了要求硬件高配置,还需要解决诸如标定、同步、左右图像对匹配等一系列软问题。

3.1 系统标定

为了实现最好的测量精度,理论上要保证:标定板应平整,图像清晰,不反光;同时,左右相机图像应完全匹配,即尽最大可能同步采集。

根据待测工件尺寸以及相机和镜头选型,计算得出在规定测量距离上的实际视野长度和宽度分别为:294.912 mm 和 235.929 6 mm。而遵循标定板尺寸是视野尺寸的 2/3 左右的原则,选择了 GP150 的标定板。该标定板采用玻璃基氧化铝面板,实现平整不变形、不反光、不透明,精度可以达到 ± 0.01 mm。

标定时,大量文献中通常的做法是由人工手持标定板在相机前变换角度,拍摄一定数量的标定图像,进而计算内外参。但是在精度要求比较高的情形下,由于手持标定板的轻微抖动,以及左右相机拍摄的时间差,共同造成左右标定图像的不同步,进而影响精度。建议的做法是将标定板物理固定或静置进行标定图像对的采集,然后调整角度进行下一图像对的采集。以次类推,完成所有标定图像的采集。

3.2 相机同步

上一节讲到了相机拍摄的时间差会对双目测量的精度产生影响。因此相机的同步触发对于高精度测量显得尤为重要。

在相机选型时需考虑采用有外同步触发功能的工业相机。通过信号发生器或高速 IO 卡产生的 PWM 信号(文中采用)可以尽可能保证左右相机图像对采集的同步性。

其次,为了防止数据拥塞和丢帧,在采集软件设计实现方面也需要重点考虑,比如:利用大内存工控机进行缓存并在采集间隙后处理数据;开启工控机电源管理模式的高性能模式等。

3.3 基于线激光投射纹理的匹配算法

为了降低弱纹理工件双目测量时左右相机图像匹配的难度,该文采用了主动投射激光以增加工件纹理。

纹理检出的核心是中心线提取算法,拟采用灰度重心法对光条中心线进行检出。

外部光照条件会对采集的光条图像产生很多噪声,为光条中心线的高精度提取造成麻烦。受到这些因素的影响,得到的线结构光图像实际上是一宽度不均、截面光强不对称而又呈单峰值变化的变形光条。

对于垂直投射的激光线而言,以高斯函数对图像行上的灰度点进行描述,如图 3 所示。

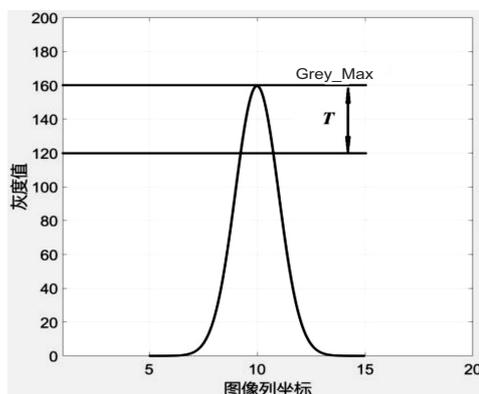


图 3 灰度重心法参数取值示意

假设 $m \times n$ 图像 $f(m, n)$ 任意一行的灰度值分布如图 3, $Grey_Max$ 为本行灰度最大值, T 为根据所需宽度给定的值,大于 T 的灰度值均参与重心的计算。

图像 $f(m, n)$ 任意第 i 行的重心公式如下:

$$[C_i] = \frac{\sum_{j=1}^n g_j \times c_j}{\sum_{j=1}^n g_j}, \quad i = 1, 2, \dots, m \quad (1)$$

其中, c_j 为列坐标值。

$$g_j = \begin{cases} 1, & \text{像素灰度值} > Grey_Max - T \\ 0, & \text{像素灰度值} \leq Grey_Max - T \end{cases}$$

C_i 为第 i 行的重心坐标,当 i 遍历每一行,则得到一条完整的激光投影的中心线。

使用上述公式需要在每一图像行中遍历每一列寻找灰度值最亮的点的坐标,搜索范围太大。而从图 1 得知,该方法中激光投影线条随着拍摄的进行是移动的。对于任意一帧图像,激光投影线条在图像中的位置是可预估的,故只需要在激光投影线条附近搜索灰度值最亮的点的坐标即可。

因此,作改进如下:设图像拍摄帧率为 f ,则对于任意一帧图像 k 的第 i 行,对应的重心计算公式为:

$$[C_{ki}] = \frac{\sum_{j=\frac{n}{f} \times (k-1)}^{\frac{n}{f} \times k} g_j \times c_j}{\sum_{j=\frac{n}{f} \times (k-1)}^{\frac{n}{f} \times k} g_j} \quad i = 1, 2, \dots, m; \quad k = 1, 2, \dots, f \quad (2)$$

其中, c_j 为列坐标值。

$$g_j = \begin{cases} 1, & \text{像素灰度值} > Grey_Max - T \\ 0, & \text{像素灰度值} \leq Grey_Max - T \end{cases}$$

可以看出,上述改进至少有两点好处:(1)上述公式可以将原来搜索灰度值的范围从 n 个点降低为 n/f 个点,速度提升了 f 倍;(2)滤除了图像中距离光条较远的亮点对光条中心线提取的干扰。

该文基于上述算法,首先分别单独计算左右相机图像的灰度重心,进而以计算所得的重心坐标作为特征对左右相机图像进行匹配,极大地简化了双目测量图像特征匹配的复杂度。

4 实验及结果

假设系统工况为:待测物距为 1 200 mm,扫描精度为 1 mm,完成一次扫描用时为 1 s,扫描幅面为 300 mm。

那么该系统在一秒内,应该获取 200 条检测线;线激光的速度为 0.3 m/s;相机帧率至少为 200 fps,可选产品其对应的像素为 130 万;再由物距 1 200 mm 乘以实际光学放大倍率得到镜头焦距的理论值为 24.5 mm。

则采集系统选型如下:

激光器选用可调线宽的 450 nm 线激光器。滑台选用 FSL40 直线模组。两台 WP-UT130M 灰度相机,配备两个型号为 WP-2M2514-C 的 25mm 焦距镜头。在同源外触发模式下,两台相机理论上可以实现最高 210 帧的同步拍摄。

在完成图像的采集后,随后由上位机算法完成图像的存储、光条中心线提取、图像匹配、三维点云计算等后处理。

遵循 3.1 节系统标定的方法,得到系统标定以后的重投影误差,如图 4 所示。

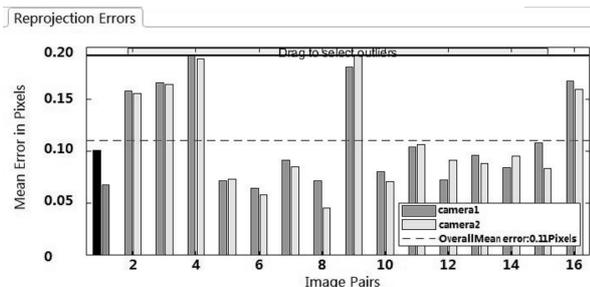


图 4 双目测量系统标定重投影误差



图 5 待测对象

实验室中使用如图 5 所示的纸盒和背景墙组合作为待测对象。其中,图像最上方纸杯底与背景面的距离为 62.5 mm,图像中间盒子与背景面距离为 53 mm,

图像最下面纸盒与背景面距离 40 mm。应用文中方法,最终得到的 3D 点云数据如图 6 所示。

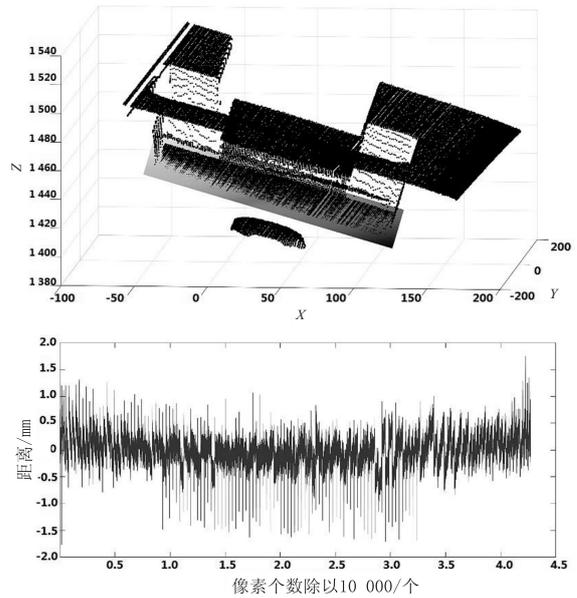


图 6 点云数据误差分析

从图 6 可以看出,围绕中间盒子平面的误差分布情况,这里给出的是中间盒子拟合平面与盒子上所有的经计算得到且未经任何剔除处理的实际点云数据之差。可以看出,测量得到的距离数据一致性非常好,所有的点云均匀地分布在中间盒子拟合平面两侧 ± 1 mm 以内。

实验表明,经过去除噪点处理的点云与拟合平面的误差可以控制在 0.22 mm 以内,如图 7 所示。其中,中间盒子点云数据与拟合平面的残差直方图分布见图 8。

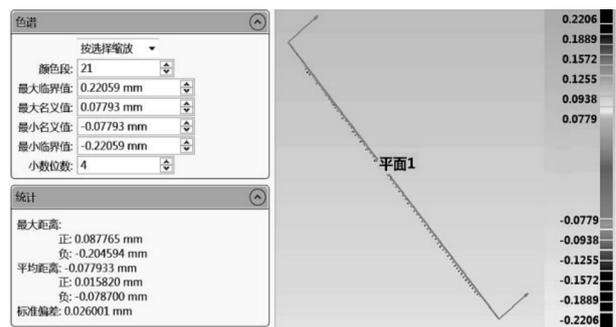


图 7 点云数据误差分析(去噪点后)

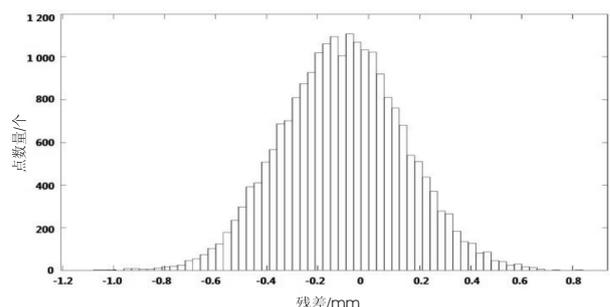


图 8 点云数据与拟合平面的误差得到的残差直方图

进一步由正态分布检验方法可验证点云到拟合平面的距离误差符合正态分布,进而可证明该误差呈现收敛状态:对应于 1 个、2 个和 3 个标准差 1σ 、 2σ 和 3σ ,对应的置信水平分别为 68.26%、95.45% 和 99.73%,对应的最大误差分别为 <0.06 、 <0.12 和 <0.17 。

5 结束语

提出了一种改进的灰度重心法,并应用在双目测量当中,在 1 200 mm ~ 1 500 mm 距离处实现了基于线激光投射的双目立体视觉非接触测量系统,测量原始数据的距离误差为 ± 1 mm,数据处理后的精度误差可以控制在 ± 0.2 mm 以内。日后拟使用该系统实现高温风洞内的防热材料烧蚀变形测量研究,以解决高温试验无法做标记点、高温高焓对象测量困难、测量设备放置不易等问题。

参考文献:

- [1] ZHANG X, CHANG T, WANG Z, et al. Three-dimensional terahertz continuous wave imaging radar for nondestructive testing[J]. IEEE Access, 2020, 8: 144259-144276.
- [2] YAN B, CHEN L, WU C K, et al. 3D ultrasonic reconstruction of contour node represented voids and cracks[J]. NDT & E International, 2021, 117: 102382.
- [3] PAWLICZEK S, HERSCHEL R, POHL N. 3D millimeter wave screening for metallic surface defect detection[C]//2019 16th European radar conference (EuRAD). Paris, France: IEEE, 2019: 113-116.
- [4] SHEEN D M, CLARK R T, TEDESCHI J, et al. High-resolution 3D microwave imaging of a moving target using optical motion capture[C]//Passive and active millimeter-wave imaging XXII. Maryland, United States: SPIE Press, 2019.
- [5] 张智. 基于投影结构光的双目立体视觉研究[D]. 西安: 西北工业大学, 2013.
- [6] DAWDA A, NGUYEN M, KLETTE R. Accurate 3D measurement of highly specular surface using laser and stereo reconstruction[C]//2019 international conference on image and vision computing New Zealand (IVCNZ). Dunedin, Zealand: IEEE, 2019: 1-6.
- [7] MA K, ZHOU H, LI J, et al. Design of binocular stereo vision system with parallel optical axes and image 3D reconstruction[C]//2019 China-Qatar international workshop on artificial intelligence and applications to intelligent manufacturing (AIAIM). Doha, Qatar: IEEE, 2019: 59-62.
- [8] GUNATILAKE A, PIYATHILAKA L, KODAGODA S, et al. Real-time 3d profiling with rgb-d mapping in pipelines using stereo camera vision and structured ir laser ring[C]//2019 14th IEEE conference on industrial electronics and applications (ICIEA). Xi'an, China: IEEE, 2019: 916-921.
- [9] SEO B G, YOON Y H, KIM K Y. A study of 3D world reconstruction and dynamic object detection using stereo images[J]. Journal of the Korea Academia-Industrial Cooperation Society, 2019, 20(10): 326-331.
- [10] 杨振华. 暂冲式高速风洞模型变形双目测量方法及实现[D]. 武汉: 华中科技大学, 2018.
- [11] 刘捷. 风洞试验模型弹性变形视频测量系统设计与实现[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工程大学, 2017.
- [12] 宋晋. 基于立体视觉的全视场风洞尾旋姿态测量系统设计与实现[D]. 重庆: 重庆大学, 2016.
- [13] NAJAFI N, PAULSEN U S. Operational modal analysis on a VAWT in a large wind tunnel using stereo vision technique[M]//Volume 125 of Energy. [s. l.]: Elsevier, 2017: 405-416.
- [14] 郭龙, 马军, 李明, 等. 基于三维扫描技术的结冰风洞冰形非接触测量研究[J]. 中国测试, 2018, 44(9): 18-22.
- [15] MA X, LIU W, CHEN L, et al. A photogrammetry pose measurement method for moving targets in a wind tunnel[C]//2016 IEEE international instrumentation and measurement technology conference proceedings. Taipei: IEEE, 2016: 1-5.